



Diana Margarita Garcia Martinez

**Avaliação das Condições de Estabilidade de
Tensão Considerando a Regulação Primária e
Parâmetros da Rede Variáveis com a Frequência**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento
de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Ricardo Bernardo Prada
Co-Orientador: Prof. João Alberto Passos Filho

Rio de Janeiro
Junho de 2015



Diana Margarita Garcia Martinez

**Avaliação das Condições de Estabilidade de
Tensão Considerando a Regulação Primária e
Parâmetros da Rede Variáveis com a Frequência**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Ricardo Bernardo Prada

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. João Alberto Passos Filho

Co-Orientador

UFJF

Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza

UFF

Prof. Ricardo Mota Henriques

UFJF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de junho de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Diana Margarita Garcia Martinez

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidad del Norte na cidade de Barranquilla, Colômbia em 2009. Sua área de pesquisa envolve sistemas elétricos de potência na área de estabilidade de tensão.

Ficha Catalográfica

Martinez, Diana Margarita Garcia

Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão Considerando a Regulação Primária e Parâmetros da Rede Variáveis com a Frequência/ Diana Margarita Garcia Martinez ; orientador: Ricardo Bernardo Prada; co-orientador: João Alberto Passos Filho– 2015.

152 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Estabilidade de tensão. 3. Regulação primária. 4. Múltiplas barras *swing*. 5. Parâmetros da rede variáveis com a frequência.. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para meus pais Benedicta e Jairo,
Alexandre, meu complemento,
e minhas amigas, minha bússola.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador Ricardo Prada pela paciência, compreensão, dedicação, e orientação nas diferentes etapas do desenvolvimento desta dissertação.

À CAPES e à PUC-Rio, pelo apoio financeiro, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu esposo Alexandre por estar o tempo todo ao meu lado, incondicionalmente. A minha mãe Benedicta por tudo aquilo que me ensinou e pelos muitos momentos de dificuldades que enfrentamos, mas que não impediram que me desse todos os apoios necessários, financeiro e humano. A minha prima Lorena pelo incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. À família Afonso por ter me acolhido como mais uma filha.

Aos meus colegas e amigos do curso do mestrado e do Laboratório de Sistemas de Potência, principalmente a Maxwell e Laura Cristina pelos conselhos e apoio. Ao meu amigo José David Bermúdez pelos anos de amizade ao longo de nossa formação profissional e acadêmica desde a graduação e agora no mestrado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, pela qualidade do ensino e excelente infraestrutura, essenciais para a execução do curso de mestrado.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e que participaram durante esta etapa da minha vida.

Por último, agradeço a Deus por todas as alegrias, pela saúde e pela força que me concedeu, para que conseguisse chegar até aqui.

Resumo

Martinez, Diana Margarita Garcia; Prada, Ricardo Bernardo; Passos Filho, João Alberto. **Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão Considerando a Regulação Primária e Parâmetros da Rede Variáveis com a Frequência.** Rio de Janeiro, 2015. 152p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A crescente demanda de energia elétrica faz com que a complexidade dos sistemas elétricos de potência seja cada vez maior, associado às limitações na expansão do sistema de transmissão, resulta na operação dos sistemas elétricos mais próximos de seus limites, tornando-os vulneráveis a problemas de estabilidade de tensão. Nesse contexto, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas computacionais capazes de representar os sistemas elétricos mais adequadamente, melhorando assim as condições de análise. Neste trabalho são apresentadas três modelagens do fluxo de carga mais completas que a modelagem clássica, a saber: a modelagem de múltiplas barras *swing*, a modelagem com regulação primária e a modelagem com parâmetros da rede de transmissão variáveis com a frequência. Uma vez utilizadas na solução do problema do fluxo de carga estas modelagens são estendidas para a realização do cálculo dos índices de estabilidade de tensão das barras de carga, barras de tensão controlada e barras *swing*. Testes numéricos com um sistema-teste de 6 barras são apresentados para a verificação da aplicabilidade e adequação dos modelos analisados.

Palavras-chave

Estabilidade de tensão; regulação primária; múltiplas barras *swing*; parâmetros da rede variáveis com a frequência.

Abstract

Martinez, Diana Margarita Garcia; Prada, Ricardo Bernardo (advisor); Passos Filho, João Alberto (co-advisor). **Voltage Stability Assessment Considering Primary Frequency Control and Frequency-Dependent Line Parameters**. Rio de Janeiro, 2015. 152p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The growing demand for electricity increases the complexity of electric power systems which, when combined with limitations in the expansion of transmission systems, results in the operation of electrical systems closer to their limits, making them vulnerable to voltage stability problems. In this context, there is a gap in the market for the development of computational tools that can represent the electrical systems more appropriately, thereby improving the conditions of analysis. The present study formulates three non-classical load flow representations: multiple swing buses, primary frequency control, and frequency dependent transmission network parameters. Once used in the load flow problem solving, these models are also extended to allow the calculation of voltage stability indices of load buses, controlled voltage buses and swing buses. Numerical tests with a 6-bus test system are presented to verify the applicability and adequacy of the proposed models.

Keywords

Voltage stability; primary frequency control; multiple swing buses; frequency-dependent line parameters.

Sumário

1	Introdução	18
1.1.	Considerações Gerais	18
1.2.	Objetivos	21
1.3.	Estrutura do Trabalho	22
2	Fundamentos Teóricos	23
2.1.	Introdução	23
2.2.	Operação e Controle de Sistemas de Potência [12]	23
2.2.1.	Regulação Própria	23
2.2.2.	Regulação Primária	25
2.2.3.	Área de Controle	29
2.2.4.	Regulação Secundária	34
2.3.	Estabilidade de Tensão [13] [14]	35
2.3.1.	Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão	36
2.3.2.	Curvas P, Q e ϕ Constantes	38
2.3.3.	O Limite de Estabilidade de Tensão	42
2.4.	Sumário	47
3	Fluxo de Potência	48
3.1.	Introdução	48
3.2.	Problema do Fluxo de Potência Tradicional	49
3.2.1.	Formulação Básica do Problema	49
3.2.2.	Matriz de Admitância	50
3.2.3.	Método de Newton-Raphson	51
3.3.	Fluxo de Potência com Múltiplas Barras <i>Swing</i>	56
3.4.	Fluxo de Potência Modificado com Regulação Primária	60
3.5.	Fluxo de Potência com Regulação Primária e Variação dos Parâmetros da Rede com a Frequência [7]	64
3.5.1.	Linhas de Transmissão	65
3.5.2.	Modelagem do Fluxo de Carga	67

3.6. Modelagem do Sistema-Teste (6 Barras) para Cada Caso	70
3.6.1. Modelagem do Fluxo de Potência Tradicional	71
3.6.2. Modelagem do Fluxo de Potência com Múltiplas Barras <i>Swing</i>	72
3.6.3. Modelagem Newton Raphson Modificado com Regulação Primária	74
3.6.4. Modelagem do Fluxo de Potência com Parâmetros de Linha Variáveis com a Frequência	78
3.7. Sumário	80
4 Índices de Estabilidade de Tensão	82
4.1. Introdução	82
4.2. Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão [13]	83
4.3. A Ferramenta Analítica [13]	84
4.3.1. Módulo do Determinante da Matriz [D']	86
4.3.2. Sinal do Determinante da Matriz [D']	90
4.3.3. Margem de Potência	92
4.3.4. Índice de Influência	94
4.4. Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão em Barras de Tensão Controlada e <i>Swing</i> [21]	96
4.4.1. Índices de Avaliação da Estabilidade de Tensão em Barras PV	97
4.4.2. Índices de Avaliação da Estabilidade de Tensão em Barras <i>Swing</i>	99
4.5. Cálculo dos Índices para o Sistema-Teste	100
4.5.1. Modelagem Tradicional	100
4.5.2. Modelagem para Múltiplas Barras <i>Swing</i>	106
4.5.3. Modelagem da Regulação Primária	114
4.5.4. Modelagem da Regulação Primária com Parâmetros das Linhas de Transmissão Variando com a Frequência	118
4.6. Sumário	121
5 Resultados	122
5.1. Introdução	122

5.2. Testes Antes da Atuação da Regulação Primária	123
5.2.1. Todas as Barras de Geração como Barra <i>Swing</i>	124
5.2.2. Duas Barras de Geração como Barras <i>Swing</i>	126
5.3. Testes Após Evento com Atuação da Regulação Primária e Parâmetros da Rede Variáveis com a Frequência	128
5.3.1. Diminuição de Carga em 50% do Caso-Base	129
5.3.2. Aumento de Carga em 75% do Caso-Base	133
5.3.3. Diminuição de Carga para Manter a Frequência no Limite de Operação (60,05 Hz)	137
5.3.4. Aumento de Carga para Manter a Frequência no Limite de Operação (59,95 Hz)	141
5.4. Sumário	145
6 Conclusões	147
6.1. Conclusões	147
6.2. Trabalhos Futuros	148
7 Referências Bibliográficas	150

Lista de Figuras

Figura 2.1 Curva da Variação da Carga com a Frequência	25
Figura 2.2 Característica Estática do Regulador	28
Figura 2.3 Comparação entre Constantes de Regulação	29
Figura 2.4 Sistema de Potência Representado como uma Área de Controle	29
Figura 2.5 Representação de Duas Áreas de Controle	31
Figura 2.6 Caso Normal	32
Figura 2.7 Caso de Energia de Regulação Muito Grande	33
Figura 2.8 Caso de uma Área de Controle Gerando na sua Capacidade Máxima	34
Figura 2.9 Característica $f \times P$ com Regulação Secundária	35
Figura 2.10 Sistema Série de Duas Barras	36
Figura 2.11 Curvas V_L Constante no Plano θP	39
Figura 2.12 Curvas P Constante no Plano θV	40
Figura 2.13 Curvas Q_{D1} Constante no Plano θV	41
Figura 2.14 Curvas P_L , Q_L e ϕ Constante com Carregamento Menor, Maior e Igual ao Máximo	42
Figura 2.15 Circuito com as Impedâncias de Transmissão e de Carga	42
Figura 2.16 Curvas ϕ Constante e o Limite de Estabilidade de Tensão no Plano θV	46
Figura 3.1 Modelo Equivalente π da Linha de Transmissão	65
Figura 3.2 Sistema de 6 Barras	70
Figura 3.3 Sistema de 6 barras com Circuitos Fictícios e Barras Adicionais	75
Figura 4.1 Curva ϕ Constante no Plano SV	84
Figura 4.2 Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano θV	91
Figura 4.3 Sinal da Margem na Curva ϕ Constante no Plano SV	93

Figura 4.4 Movimento dos Pontos de Operação Correspondendo à Deterioração da Margem	95
Figura 4.5 Curva SV para Análise do Índice de Influência	96
Figura 4.6 Barra de Tensão Controlada Operando nas Regiões Superior e Inferior da Curva Para ϕ Constante no Plano SV	97
Figura 4.7 Variação da Tensão no Tempo em Barras de Tensão Controlada	98

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Dados de Barra do Sistema de 6 Barras	71
Tabela 3.2 Dados de Linha do Sistema de 6 Barras	71
Tabela 5.2 Ponto de Operação Caso-Base	123
Tabela 5.3 IET com MMSW - 3 Barras <i>Swing</i>	124
Tabela 5.4 Estatismos dos Geradores	125
Tabela 5.5 IET com MRP (E1) - 3 Barras <i>Swing</i>	125
Tabela 5.6 IET com MRP (E2) – 3 Barras <i>Swing</i>	125
Tabela 5.7 IET com MMSW – 2 Barras <i>Swing</i>	126
Tabela 5.8 IET com MRP (E1) - 2 Barras <i>Swing</i>	127
Tabela 5.9 IET com MRP (E2) – 2 Barras <i>Swing</i>	127
Tabela 5.10 Ponto de Operação 1 MRP com Diminuição de 50% da Carga	129
Tabela 5.11 Ponto de Operação 2 MPRVF com Diminuição de 50% da Carga	129
Tabela 5.12 Comparação Pontos de Operação MRP e MPRVF Após Diminuição de 50% da Carga	130
Tabela 5.13 IET com MMSW Ponto de Operação 1 MRP Após Diminuição de Carga de 50%	130
Tabela 5.14 IET com MMSW Ponto de Operação 2 MPRVF Após Diminuição de Carga de 50%	131
Tabela 5.15 Comparação IET com MMSW Após Diminuição de Carga de 50%	131
Tabela 5.16 IET com MRP Após Diminuição de Carga de 50%	132
Tabela 5.17 IET com MPRVF Após Diminuição de Carga de 50%	132
Tabela 5.18 Comparação IET com MRP/MPRVF Ponto de Operação 2 Após Diminuição de Carga de 50%	132
Tabela 5.13 Ponto de Operação com Aumento de 75% da Carga	133
Tabela 5.20 Ponto de Operação 2 MPRVF Após Aumento de 75% da Carga	133
Tabela 5.21 Comparação Pontos de Operação MRP e MPRVF	

Após Aumento de 75% da Carga	134
Tabela 5.22 IET com MMSW Ponto de Operação 1 MRP Após Aumento de Carga de 75%	135
Tabela 5.23 IET com MMSW Ponto de Operação 2 MPRVF Após Aumento de Carga de 75%	135
Tabela 5.24 Comparação IET com MMSW Após Aumento de Carga de 75%	135
Tabela 5.25 IET com MRP Após Aumento de Carga de 75%	136
Tabela 5.26 IET com MPRVF Após Aumento de Carga de 75%	136
Tabela 5.27 Comparação IET com MRP/MPRVF Após Aumento de Carga de 75%	136
Tabela 5.28 Ponto de Operação 1 MRP com Frequência de 60,05 Hz	138
Tabela 5.29 Ponto de Operação 2 MPRVF com Frequência de 60,05 Hz	138
Tabela 5.30 Comparação Pontos de Operação MRP e MPRVF com Frequência de 60,05 Hz	138
Tabela 5.31 IET com MMSW Ponto de Operação 1 MRP com o Sistema Operando em 60,05 Hz	139
Tabela 5.32 IET com MMSW Ponto de Operação 2 MPRVF com o Sistema Operando em 60,05 Hz	139
Tabela 5.33 Comparação IET com MMSW com o Sistema Operando em 60,05 Hz	140
Tabela 5.34 IET com MRP com o Sistema Operando em 60,05 Hz	140
Tabela 5.35 IET com MPRVF com o Sistema Operando em 60,05 Hz	140
Tabela 5.36 Comparação IET com MRP/MPRVF com o Sistema Operando em 60,05 Hz	141
Tabela 5.37 Ponto de Operação 1 MRP com o Sistema Operando em 59,95 Hz	141
Tabela 5.38 Ponto de Operação 2 MPRVF com Frequência de 59,95 Hz	142

Tabela 5.39 Comparação Pontos de Operação MRP e MVPRF com Frequência de 59,95 Hz	142
Tabela 5.40 IET com MMSW Ponto de Operação 1 MRP com o Sistema Operando em 59,95 Hz	143
Tabela 5.41 IET com MMSW Ponto de Operação 2 MPRVF com o Sistema Operando em 59,95 Hz	143
Tabela 5.42 Comparação IET com MMSW com o Sistema Operando em 59,95 Hz	143
Tabela 5.43 IET com MRP com o Sistema Operando em 59,95 Hz	144
Tabela 5.44 IET com MPRVF com o Sistema Operando em 59,95 Hz	144
Tabela 5.45 Comparação IET com MRP/MPRVF com o Sistema Operando em 59,95 Hz	144

Abreviaturas e Siglas

∇P : Vetor gradiente de potência ativa

∇Q : Vetor gradiente de potência reativa

Δf : variação da frequência de operação do sistema

ΔP_D : variação da potência ativa demandada

$1/R$: Energia de regulação da máquina [MW/Hz]

A: representa a matriz Jacobiana original do sistema, excluindo as linhas e colunas referentes à barra em análise

B: representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa do sistema em relação às variáveis dependentes da barra em estudo

B': Matriz de susceptância

C: representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa da barra em análise em relação às outras variáveis dependentes do sistema

D: representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa da barra em análise em relação às suas próprias variáveis dependentes

D_c : coeficiente de amortecimento da carga com a frequência

f : Frequência de operação

G': Matriz de condutância

IET: Índices de Estabilidade de Tensão

II: Índice de influência da ação de controle sobre a margem de potência

J: Matriz Jacobiana

LEA: Limite de estabilidade angular

LET: Limite de estabilidade de tensão

M: Margem de potência em p.u. ou %

MRP: Modelagem com Regulação Primária

MSW: Modelagem com Múltiplas Barras *Swing*

nb : número de barras

ng : número de barras de geração com geradores com regulação primária

NPQ: Número de barras do tipo PQ do sistema

NPV: Número de barras do tipo PV do sistema

P_i : geração líquida (geração menos carga) de potência ativa na barra i em análise

Q_i : injeção líquida de potência ativa na barra i em análise

R : constante de regulação

r.p.: regime permanente

s : estatismo

S_i : Potência aparente injetada na barra i no ponto de operação em análise

S_m : Estimativa da máxima potência que poderia ser injetada na barra i

V_k : Magnitude de tensão nodal (barra i)

Z_c : Impedância de carga

Z_t : Impedância da linha de transmissão

α_t : Ângulo da impedância da linha de transmissão

β : Índice de ângulo entre os vetores gradientes ∇P e ∇Q

β_i : Característica natural

θ_i : ângulo da tensão nodal

ϕ : Ângulo do fator de potência